Transistor Currents

Figure 6.3 Current flow in an *npn* transistor biased to operate in the active mode. (Reverse current components due to drift of thermally generated minority carriers are not shown.)

يبين الشكل طريقة تحييز الترانزستور (n-p-n) في منطقة النشاط حيث ان وضع الجهد V_{BE} سوف يجعل القطعة p-type (القاعدة) اعلى جهدا من القطعة n-type (الباعث) وهو ما يجعل وصلة الباعث – القاعدة في وضع الانحياز الامامي. في حين ان وضعية توصيل الجهد V_{CB} سوف يجعل المجمع اعلى جهدا من القاعدة وبالتالي فان وصلة المجمع – القاعدة سوف تصبح في وضع الانحياز العكسي. وهما الشرطان اللازمان لتشغيل الترانزستور في منطقة النشاط.

التيارات الناتجة عن حركة حاملات الشحنة في الترانزستور:

كما سبق الاشارة اليه هناك نوعان من الحركة لحاملات الشحنة في الترانزستور وهما حركتي الانتشار والانجراف وكما هو معلوم ان التيار ينتج عن حركة حاملات الشحنة فاننا سوف نركز على التيارات الناتجة عن حركة حاملات الشحنة بطريقة الانتشار واهمال التيارات الناتجة عن حركة حاملات الشحنة بالانجراف في البداية ولكننا سوف نوضح اثر تلك التيارات لاحقا.

ان عملية التحييز الامامي لوصلة الباعث القاعدة سوف ينتج عنه سريان تيارخلال الوصلة وهذا التيار مكون من مركبتي التيار الناتج عن سريان الالكترونات من الباعث الى القاعدة وسريان الثقوب من القاعدة الى الباعث. وكما تمت الاشارة اليه سابقا فان تركيز الالكترونات في القطعة (n-type) والتي تمثل الباعث في حالة الترانزستور (n-p-n) يكون كبيرا بالمقارنة مع تركيز الثقوب في القطعة (p-type) والتي تمثل القاعدة في هذه الحالة ويتم الحصول على ذلك عند تصنيع الترانزستور- (حجم الاسهم في الشكل السابق يبين اختلاف تركيز حاملات الشحنة بين كل من الباعث والقاعدة).

ويبين الشكل تفاصيل التيارات الناتجة عن حركة حاملات الشحنة عند تشغيل الترانزستور (n-p-n) في منطقة النشاط. ونلاحظ من الشكل ان تيار الباعث (I_E) يكون خارجا من وصلة الباعث وهو في

نفس اتجاه التيار الناتج من سريان الثقوب في حين التيار الناتج عن سريان الالكترونات يكون في عكس اتجاه حركة الالكترونات. وبالتالي فان تيار الباعث يكون مركب من مركبتين ويكون التيار الناتج عن مركبة الالكترونات هو السائد بسبب تركيز الالكترونات العالي في منطقة الباعث.

لنقم الان بدراسة وتتبع حركة الالكترونات المحقونة من الباعث الى القاعدة حيث تصبح حاملات الشحنة الاغلبية المحقونة من الباعث حاملات شحنة اقلية عندما تصل الى القاعدة ونتيجة لضيق القاعدة فان توزيع حاملات الشحنة الاقلية ياخذ شكل الخط المستقيم كما هو مبين في الشكل التالي.

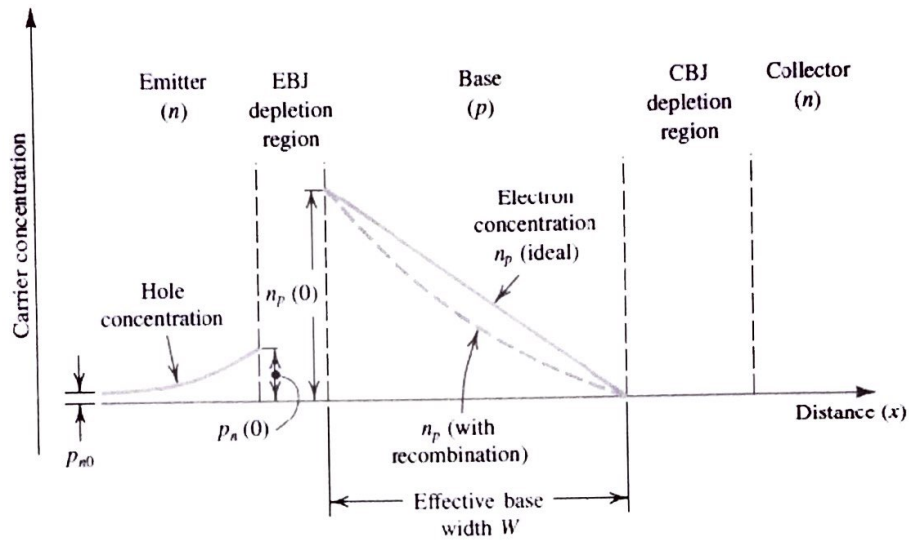



Figure 6.4 Profiles of minority-carrier concentrations in the base and in the emitter of an *npn* transistor operating in the active mode: $v_{BE} > 0$ and $v_{CB} \geq 0$.

حيث يكون تركيز حاملات الشحنة الاقلية (الالكترونات) في القطعة (p–type) التي تمثل القاعدة اعلى ما يمكن عند حافة المنطقة الناضبة للقاعدة من جهة الباعث ويرمز له بالرمز $n_P(x=0) = n_P(0)$. ويكون تركيز حاملات الشحنة الاقلية (الالكترونات) عند حافة المنطقة الناضبة للقاعدة من جهة المجمع يساوي صفر ويرمز له بالرمز $n_p(x=W)=n_p(W)=0$ حيث ان W هي العرض الفعال للقاعدة. وكما هو الحال في اي وصلة ثنائية فان تركيز الحاملات يتناسب مع المقدار الاسي (للجهد V_{BE}) كما هو مبين:

$$\boldsymbol{n_p(0)\ \alpha\ \exp\left(\frac{v_{BE}}{nV_T}\right)}\quad at\ n = 1\ and\ V_T = 25mV\ @R.T.$$

$$\boldsymbol{n_p(0) = n_{p0}\exp\left(\frac{v_{BE}}{nV_T}\right)}$$

حيث ان n_{p0} تمثل تركيز حاملات الشحنة الاقلية (الالكترونات) عند الاتزان الحراري والجهد v_{BE} هو جهد الانحياز الامامي للوصلة الثنائية.

التركيز عند حافة المنطقة الناضبة للقاعدة من جهة المجمع

التركيز يساوي صفر بسبب ان الجهد v_{CB} يسبب في سحب الالكترونات عبر الوصلة (CBJ) الى المجمع →

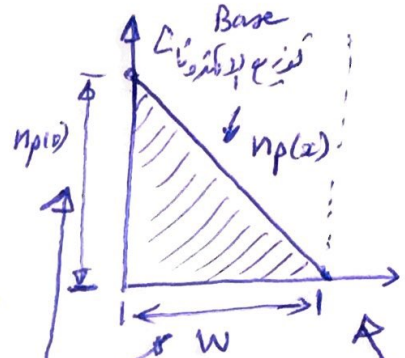
$$n_p(W) = 0$$

Base

توزيع الالكترونات

$n_p(0)$

$n_p(x)$

W

$$I_n = A_E q D_n \frac{dn_p(x)}{dx}$$

$$= A_E q D_n \left(-\frac{n_p(0)}{W}\right)$$

توزيع حاملات الشحنة الاقلية (الالكترونات في القاعدة) ويسبب في مرور تيار يتناسب طرديا مع ميل المستقيم الدال على توزيع تركيز حاملات الشحنة الاقلية

حيث ان :-

A_E = مساحة المقطع للوصلة (القاعدة - الباعث)

q = شحنة الالكترون

D_n = ثابت الانتشار للالكترونات

W = عرض القاعدة الفعال

$$I_n = \frac{A_E q D_n}{W} n_{p0} \exp\left(\frac{v_{BE}}{nV_T}\right)$$

Collector current : تيار المجمع

$$i_C = I_n \Rightarrow$$

التيار الناتج عن الالكترونات التي وصلت الى المجمع

$$i_C = \frac{A_E q D_n n_{p0}}{W} \exp\left(\frac{v_{BE}}{nV_T}\right)$$

$$i_C = I_S \exp\left(\frac{v_{BE}}{nV_T}\right)$$

$$I_S = \frac{A_E q D_n n_{p0}}{W}$$

$$I_S = \frac{A_E q D_n n_i^2}{N_A W} \Leftarrow n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

من المعادلات السابقة يمكن ملاحظة الآتي :-

- انه التيار (i_c) لا يعتمد على قيمة الجهد (V_{CB}) اي جهد (المجمع - القاعدة)

- ونلاحظ ان التيار (i_c) يتناسب مع المقدار الأسي لجهد وصلة (القاعدة - الباعث) اي جهد الوصل (V_{BE})

- انه تيار التشبع او (البثرب) يتناسب عكسيا مع عرض القاعدة (W) ويتناسب طرديا مع مساحة وصلة (EBJ)

- عموما قيمة التيار I_S تتراوح ($10^{-12} \rightarrow 10^{-18}A$) ويعتمد ذلك على حجم النبيطة (size of the device)

- حيث انه ($I \propto n_i^2$) بالتالي فانه دالة في درجة الحرارة حيث انه يتضاعف مع كل زيادة في درجة الحرارة بمقدار (5 درجات مئوية)

- حيث انه ($I_S \propto A_E$) مساحة الوصلة (حجم النبيطة) وبالتالي فانه اذا كان لدينا مقطعان مع وجود اختلاف فقط في مساحة (EBJ) وبالتالي فانه الاختلاف في تيار التشبع (I_S) سيكون نفس النسبة وبالتالي فانه لنفس الجهد (V_{BE}) فانه النبيطة ذات المساحة الاكبر يكون تيار المجمع لها اكبر من الاصغر منها مساحة . ويستخدم هذا المفهوم في تصميم الدوائر المتكاملة Integrated Circuit - design

base current – تيار القاعدة

- تيار القاعدة يتكون من مركبتين

⊛ المركبة الأولى (i_{B_1}) الناتجة من حقن الثقوب من القاعدة إلى الباعث هذه المركبة تتناسب مع $\left(e^{V_{BE}/V_T}\right)$.

⊛ المركبة الثانية (i_{B_2}) الناتجة من الثقوب التي تزود القاعدة من المصدر الدائرة الخارجية وذلك لتعويض الثقوب التي فقدت نتيجة إعادة الاتحاد مع الالكترونات.

وحيث أن (i_{B_2}) تتناسب مع عدد الالكترونات المحقونة للقاعدة وبالتالي فهو يتناسب مع $\left(e^{V_{BE}/V_T}\right)$

- التيار الكلي للقاعدة ⟸ $i_B = i_{B_1} + i_{B_2}$ يتناسب مع $\left(e^{V_{BE}/V_T}\right)$

وبالتالي يمكن التعبير عن تيار القاعدة كجزء من تيار المجمع على الشكل التالي

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} \Rightarrow i_B = \left(\frac{I_S}{\beta}\right) e^{V_{BE}/V_T}$$

β = common – emitter current gain

← من خلال هذه العلاقة يمكن ملاحظة أن (β) تتأثر

- عرض القاعدة (W)
- النسبة بين تركيز الحاملات في كل من القاعدة والباعث $\left(\frac{N_A}{N_D}\right)$

- للحصول على قيمة عالية لـ (β) ⟸ ($W \to$ small) تركيز حاملات منخفض في القاعدة وعالي في الباعث (making $\frac{N_A}{N_D}$ small)

حيث ان التيار الداخل للترانزستور يساوي التيار الخارج

Emitter current – تيار الباعث

$$i_E = i_C + i_B$$

∴ $i_B = \frac{i_C}{\beta}$

∴ $i_E = i_C + \frac{i_C}{\beta}$ ⟹ $i_E = \frac{\beta+1}{\beta} i_C$

بالتعويض عن قيمة i_C

∴ $i_E = \frac{\beta+1}{\beta} I_S e^{v_{BE}/V_T}$

$$i_E = \left(\frac{\beta+1}{\beta}\right) I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

also $i_C = \alpha i_E$

∴ $\alpha = \frac{\beta}{\beta+1}$ ⟹ $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$

$$i_E = \left(\frac{I_S}{\alpha}\right) e^{v_{BE}/V_T}$$

also

- لاحظ ان ابسط تغير في قيمة (α) يؤدي الى تغير كبير في قيمة (β)

α = common - base current gain

i_C ⇒ is independent of the value of the collector voltage as long as the base-collector junction remains reverse biased that is $(v_{CB} \geq 0)$

- في منطقة النشاط (active region) يمكن اعتبار أنه المجمع هو مصدر تيار ثابت (constant-current source) وتتحدد فيه التيار بالجهد (V_{BE})

- تيار القاعدة (i_B) يساوي ($\frac{1}{\beta}$) من تيار المجمع (i_C)

- تيار الباعث هو مجموع التيارين السابقين ($i_C + i_B$).

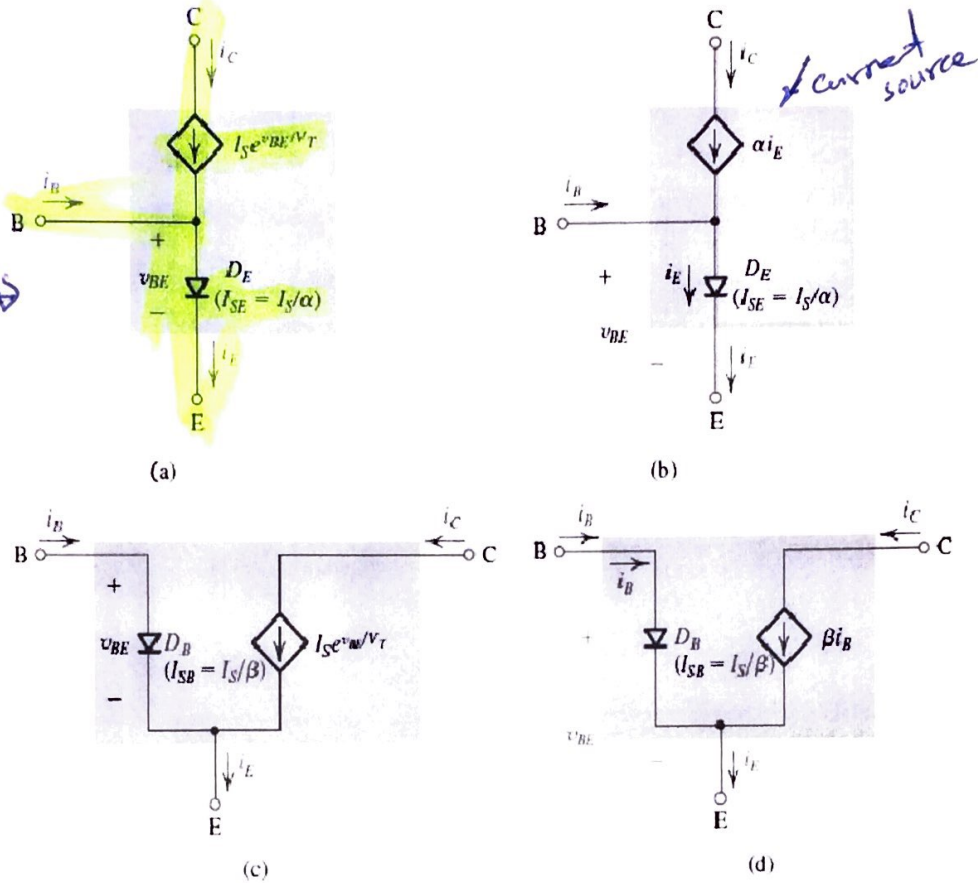



Figure 6.5 Large-signal equivalent-circuit models of the *npn* BJT operating in the forward active mode.

- يمكن التعبير عن العلاقات السابقة بالنموذج المبين في الشكل (a)

$$I_{SE} = \frac{I_s}{\beta}$$

$i_E \xrightarrow{\text{related to}} v_{BE} \Rightarrow$ This model is nonlinear voltage-controlled current source.

- يمكن تحويل النموذج في الشكل (a) إلى النموذج في الشكل (b) ويصبح current-controlled current source

Quiz 1

What is the difference between the two given circuits?

What is the transistor type in each circuit?

Are the voltage polarities correct or false for each circuit?